УДК 629.05.681.787.535

СЛЕДЯЩИЙ ОПТИЧЕСКИЙ ФАЗОМЕТР

С.М. Слободян

Инновационный центр "ТЕСТ", г.Томск
E-mail: IC_Test@ inbox.ru

Предложен принцип следящего оптического фазометра с фазовым дискриминатором сигнала рассогласования положения интерференционной полосы. Проведена оптимизация параметров фазометра по условию экстремума качества функционирования. Приведены результаты практической апробации метода.

Гетеродинные интерферометрические устройства, предназначенные для приема и обработки излучения когерентных оптических полей и лазерных пучков и используемые для измерения перемещения объектов, являются оптическими фазометрами. Они обладают наибольшей чувствительностью в инфракрасной области спектра, решая проблему отсутствия в этой области спектра фотоприемников с внутренним усилением [1, 2]. Эта возможность обусловлена физической сущностью интерферирующего взаимодействия смешиваемых на поверхности фотоприемника лазерного сигнала с когерентным сигналом опорного гетеродинного излучения. При этом выходной сигнал фотоприемника является сигналом промежуточной частоты, определяемой величиной разности их частот и начальных фаз, с амплитудой, пропорциональной произведению амплитуд смешиваемых излучений. Фактор перемножения амплитуд обусловливает эффект преддетекторного управляемого усиления сигнала и создает исключительные условия пренебрежимо малого влияния собственных шумов фотоприемника на результат обнаружения слабых оптических сигналов. Для чисто дробовых шумов пороговое значение предельной чувствительности равно уровню минимальной мощности обнаруживаемого полезного сигнала $N_{пр}$ при отношении сигнал/шум равным 1 для эквивалентной мощности шума в полосе пропускания фильтра 1 Гц

$$N_{пр} = \hbar\nu/\eta = 1,79 \cdot 10^{-21} \cdot \lambda/\eta, \text{ (Вт/Гц)мкм},$$

где $\hbar$ = 6,63·10^{-34} Дж·с – постоянная Планка; ν – частота, Гц; λ – длина волны излучения, мкм и η – квантовая эффективность фотоприемника.

Гетеродинные фазометры практически применяются для: измерения параметров движения оптически наблюдаемых объектов, частоты наблюдаемого оптического поля и изменений дальности до одиночной цели с точностью порядка 0,06λ; проведения спектрального анализа локационного сигнала, измерения структуры оптического поля в турбулентной атмосфере, контроля шероховатости поверхности, юстировки лазерных систем, контроля микромишеней для термоядерного синтеза, диагностики качества оптики и корректоров волнового фронта, контроля влияния термооптических явлений на средства адаптивной оптики со среднеквадратическим отклонением менее 0,014λ. Они выполняются, как правило [1, 2], на основе интерферометра Майкельсона (рис. 1), модифицируемого в зависимости от особенностей решаемой задачи, и отличаются способами обработки и представления сигнала приемника и вариантами исполнения фото- и электронных блоков регистрации.

Для повышения точности измерения перемещения объектов контроля гетеродинными оптическими фазометрами могут быть использованы принципы слежения за объектами [3] с различными способами дискриминирования видеосигнала фотоприемника. Рассмотрим ниже эффективность использования в оптическом фазометре принципа слеже-

ния за полосой интерференции с фазовым способом дискриминирования видеосигнала, получаемого в результате управляемого следящего сканирования полосы интерференционной картины в плоскости изображения, совмещенной с чувствительной поверхностью фотоприемника (ФП). Так как сущность метода оптической гетеродинной обработки сигналов заключается в смешении излучения, несущего информацию об объекте, и опорного с последующим выделением информативных признаков полезного сигнала, то основным условием эффективности гетеродинного приема является высокая когерентность смешиваемых на квадратичном фотодетекторе оптических сигналов.

В нашем примере (рис. 1) сигнальный и гетеродинный потоки образованы путем расщепления излучения одного лазерного пучка, чаще всего, коллимированного. Излучение одного из расщепленных потоков E_0 промодулируем по фазе путем перемещения зеркала пьезоприводом. Для увеличения переменной составляющей энергии поля излучений в плоскости анализа изображения, оптимальный коэффициент расщепления пучка определяется путем снижения количества переотражений опорной части пучка. Расщепление излучения лазерного пучка и использование его части, отводимой с помощью полупрозрачного светоделителя, в качестве опорного гетеродинного излучения с последующей, в одном из плеч оптической схемы, фазовой модуляцией, осуществляемой путем продольного сдвига пьезоприводом зеркального отражателя, позволяет обеспечить полную синхронизацию обоих колебаний и, необходимую для гетеродинирования, взаимную когерентность смешиваемых излучений, отражающей постоянство разности фаз за время наблюдения. Невозмущенное сигнальное E_s и опорное E_0 гетеродинное оптическое излучение имеют вид

$$E_S(t) = A_S \exp[i(\omega_S t + \Phi_S)];$$
$$E_0(t) = A_0 \exp[i(\omega_0 t + \Phi_0)],$$

где A_s и A_0 – амплитуда сигнального и опорного гетеродинного колебаний; i – мнимая единица; ω_s и ω_0 – несущие круговые частоты, а Φ_s и Φ_0 – начальные фазы этих колебаний. Поскольку оптический блок построен по известной локационной схеме интерферометра Майкельсона и сигнальный и гетеродинный потоки излучения являются частями одного лазерного пучка необходимой когерентности, то $\omega_s \equiv \omega_0$. При этом перераспределение энергии в картине интерференции меняется в зависимости от фазовых соотношений отдельных лучей. Флуктуации разности фаз снижают когерентность.

Для совмещенной с поверхностью фотоприемника области оптического смешения излучение волн сигнальное, прошедшее первое плечо интерферометра, и гетеродинное опорное, прошедшее второе плечо, с учетом длин интерференционных плеч смесительного блока, описываются выражениями:

$$E_S(t) = A_S \exp\{i[\omega_S t - 2k l_2 + \Phi_{0S}]\};$$
$$E_0(t) = A_0 \exp\{i[\omega_0 t - 2k(l_1 + a_M \sin\Omega_M t + \varphi_{OM}) + \Phi_{00}]\},$$

где: $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; l_1 и l_2 – длины плеч интерферометра соответственно для опорного и сигнального излучений; Φ_{0S} и Φ_{00} – начальные фазы колебаний; a_M, Ω_M и φ_{OM} – амплитуда, круговая частота и начальная фаза модулированного колебания, обусловленного смещением зеркала, закрепленного на пьезоприводе. Фотоотклик приемника на суммарное оптическое поле $E=E_S+E_0$, получаемого в результате смешения излучений, определяется как:

$$I = |A_s|^2 + |A_0|^2 + 2A_s A_0 \cos[\Delta\Phi_0 - m_M \sin(\Omega_M t + \varphi_{OM})],$$

где $\Delta\Phi_0 = 2k(l_2 - l_1)$ – разность фаз между опорным и сигнальным лучами, обусловленная различием длин плеч интерферометра и $m_M = 2ka_M$ – индекс фазовой модуляции.

При равенстве длин горизонтального и вертикального плеч интерферометра в плоскости изображения наблюдается интерференционная карти-

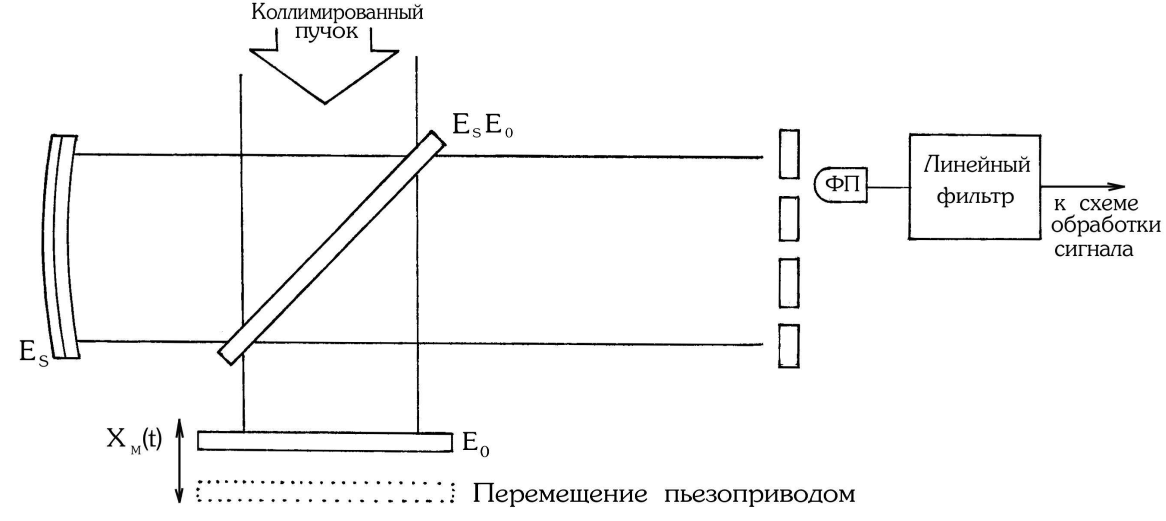


Рис. 1. *Схема смесительного блока следящего оптического фазометра*

на, структура которой определяется пространственной расфазировкой волновых фронтов смешиваемых излучений. Принципиально неважно какое из плеч интерферометра будет подвижным. При изменении длины одного из двух плеч интерферометра количественной мерой разности хода между отдельными лучами служит смещение интерференционных полос относительно местоположения их пространственного разноса. Перемещение полосы на величину их пространственного разноса соответствует относительному взаимному фазовому сдвигу между волнами интерферирующих излучений, равному 2π. Линейный масштаб взаимного расположения полос интерференции устанавливается юстировкой начального расположения оптических элементов смесительного блока. При подаче на пьезоэлектрический привод сигнала управляющего воздействия, за счет проявления продольного пьезоэффекта, зеркало (нижнее на рис. 1) переместится на величину $X_М(t)$, и волна опорного излучения приобретет дополнительное приращение фазы, равное разности фаз между интерферирующими пучками:

$$\Delta\Phi(t) = 4\pi\, X_{\grave{i}}\ (t)/\lambda.$$

Отсюда видно, что для изменений приращений разности фаз в угловом диапазоне $\pm 2\pi$ достаточно обеспечить управление удлинением пьезопривода $X_М(t)$ в диапазоне перемещений, равных половине длине волны ($\pm\lambda/2$) излучения основного лазерного пучка. Интенсивность получаемой картины интерференции меняется в плоскости изображения по закону $I(t) = I_0[1+\cos[4\pi X_М(t)/\lambda]]$, а ее контраст $K_{ИК} = (I_{\max} - I_{\min})/(I_{\max} + I_{\min})$ при $A_S \sim A_0$ будет максимален: $2A_SA_0/(A_S^2 + A_0^2) = 1$. При малом контрасте распределение освещенности в полосах или кольцах интерференционной картины из-за влияния аберрации больше соответствует распределению Гаусса.

Если периодически с периодом $T_{ск}$ и Ω – частотой изменять сигнал управления пьезоприводом, перемещающим зеркало вдоль оси, ортогональной его отражающей поверхности, то длина L опорного плеча интерферометра будет промодулирована по некоторому периодическому закону $L(\Omega,t) = L(\Omega,\mathrm{t} + T_{ск})$ с амплитудой ΔL перемещения зеркала, определяемой амплитудой напряжения управления пьезоприводом.

Периодическое изменение $L(\Omega,t)$ полос интерференции, разнесенных в плоскости изображения, на интервал ΔX кратный $\alpha\gamma/2$, относительно их среднего положения L_0, совмещенного с положением фотоприемника (рис. 2, *а*) и определяемого амплитудой $\Delta L(\Omega,t + T_{ск})$ пробных реверсивных относительно положения L_0 движений зеркала $L(\Omega,t + T) = L_0(t_0) + \Delta L(\Omega,t + T_{ск})$ в выбранном рабочем плече интерферометра, в полной мере отражает закономерность изменения с учетом постоянной составляющей выходного частотно-модулированного сигнала фотоприемника

$$i_c(\Omega,\Delta t,t) = K_\varepsilon I_0[1 - m\,\cos[\frac{2\pi}{\Delta x}(L_0 + \Delta L\sin\Omega t)]],$$

где K_ε – коэффициент пропорциональности, учитывающий геометрию апертур, чувствительность приемника и функции их распределения. Вполне естественно, что размер следящего сканирования определяет интервал перемещения полос $\Delta x = \alpha\lambda/2$ (где α – некоторое число) в плоскости изображения на чувствительной поверхности фотоприемника. Следящее сканирование полосой интерферен-

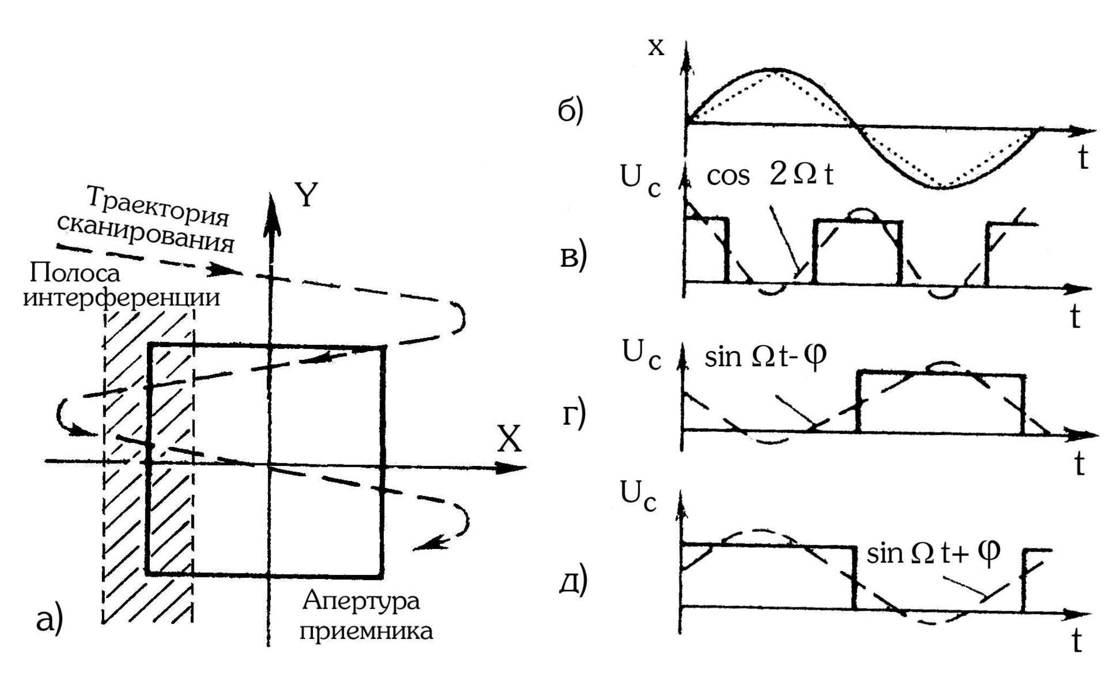


Рис. 2. *Принцип слежения в оптическом фазометре с фазовым дискриминатором*

ции поля приемника осуществляется по закону изменения напряжения управления приводом зеркала синусоидальной или симметричной треугольной форм (рис. 2, *б*) выбранной частоты и амплитуды, формируемых генератором напряжения сигналов следящего сканирования [4]. Промодулированная в зависимости от величины и направления смещения полосы относительно апертуры приемника последовательность видеоимпульсов сигнала фотоприемника без учета постоянной составляющей, имеющая вид

$$i_c(\Omega, \Delta t, t) = K_\varepsilon m I_0 \cos\frac{4\pi}{\lambda}(L_0 + \Delta L \sin\Omega t),$$

выделяется синхронным детектором блока фильтрации видеосигнала для сравнения фазовым дискриминатором с опорным сигналом генератора следящего сканирования.

Фазовый способ выделения сигнала рассогласования при смещении интерференционной полосы может быть реализован с любой закономерностью следящего сканирования. Рассмотрим одну из модификаций фазового способа выделения сигнала рассогласования. Ее особенность заключается в том, что частоты следования видеоимпульсов фотоприемника при отсутствии смещения и при наличии смещения полосы интерференции относительно центра апертуры ФП, виртуально совмещенного с центром траектории следящего сканирования, различны. Назовем эту модификацию частотно-фазовым способом. Принцип следящего сканирования и выделения сигнала рассогласования положения полосы интерференции частотно-фазовым способом в оптическом фазометре представлен выше. Для определения местоположения полосы интерференции относительно центра фотоприемника в малой области поля, соизмеримой с поперечным размером полосы, осуществляется сканирование полосой ФП путем перемещения зеркала одного из плеч интерферометра пьезоприводом под воздействием напряжения синусоидальной, линейной пилообразной или треугольной форм. Примерная траектория сканирования полосой поля фотоприемника (рис. 2, *а*) соответствует поданному на пьезопривод напряжению вида (рис. 2, *б*) с амплитудой сканирования порядка смещения полосы на $\pm\lambda/2$. Это напряжение центрировано относительно опорного уровня, характеризующего среднее квазистатическое положение полосы интерференции в полной картине на временном интервале сканирования. В общем случае, этот уровень не остается постоянным.

Если центры изображения полосы интерференции и апертуры приемника при осуществлении следящего сканирования относительно опорного уровня, виртуально совпадающего с центром поля ФП, совмещены, то с выхода фотоприемника снимается последовательность видеоимпульсов (рис. 2, *в*). Каждый из видеоимпульсов расположен симметрично относительно точки перехода сигналом отклонения зеркала через опорный уровень, являющейся нулевым уровнем для напряжения управления следящим сканированием зеркалом. Огибающая этих видеоимпульсов, в соответствии с разложением в ряд Фурье, содержит только четные гармоники основной частоты следящего сканирования Ω. Штриховой линией (рис. 2, *в*) показана гармоника видеоимпульсов ($\sim\cos 2\Omega t$), амплитуда которой ($\sim K_\varepsilon I_0$) является мерой плотности потока излучения в изображении полосы интерференции. При смещении полосы вправо от центра траектории следящего сканирования снимается видеосигнал вида (рис. 2, *г*). Огибающая его импульсов, асимметричная относительно временной оси, содержит гармонику основной частоты, но с фазой, сдвинутой на 180° по отношению к фазе сигнала (рис. 2, *б*) следящего сканирования зеркалом. При отклонении полосы влево временное положение видеоимпульсов (рис. 2, *д*) смещено относительно исходного положения, и фаза их первой гармоники будет совпадать с фазой сигнала (рис. 2, *б*) сканирования. В обоих случаях амплитуда второй гармоники видеосигнала заметно уменьшается.

Использование принципа синхронного детектирования сигнала, получаемого при следящем сканировании, позволяет выделить сигнал рассогласования расположения центров фотоприемника и полосы, выбранной в качестве объекта контроля. Для определения направления отклонения полосы интерференции относительно центра следящего сканирования первая гармоника видеосигнала с частотой Ω, выделяемая синхронным фильтром, поступает в фазовый дискриминатор для сравнения с фазой сигнала управления следящим сканированием, используемого в качестве опорного сигнала. Практическая реализация фазового дискриминатора достаточно проста [3]. Наличие сдвига по фазе (0°, 180°) сравниваемых сигналов и является указателем направления отклонения полосы от центра траектории следящего сканирования, виртуально совмещенного с центром приемника. Амплитуда первой гармоники видеосигнала (рис. 2 *г, д*) однозначно, если смещение изображения полосы не превышает шага расположения полос интерференции, определяет величину отклонения, которое находится интегрированием сигнала первой гармоники с соответствующим весом. Крутизна характеристики фазового дискриминатора, формирующего сигнал фазового рассогласования, вычисляемая по известной [3] методике, находится в прямой зависимости с величиной коэффициента модуляции m и амплитуды ($\sim K_\varepsilon I_0$) видеосигнала, функционально связанных с величиной интенсивности излучения, геометрией апертуры, квантовой эффективностью и другими особенностями фотоприемника. Зависимость относительной крутизны характеристики фазового дискриминатора от относительного размера следящего сканирования в относительных единицах угловой меры шага расположения полос интерференции носит экстремальный характер. Оптимальный размер следящего сканирования зеркалом интерферометра, обеспечивающий наибольшую крутизну характеристики фа-

зового дискриминатора, составляет: в линейной мере – $0,3125\lambda_H$ – шага расположения полос интерференции и $0,63\pi$ – в угловой мере изменения фазового набега модуляции фазы при следящем синусоидальном сканировании. В области малых рассогласований крутизна дискриминационной характеристики в прямой пропорции зависит от размера следящего сканирования зеркалом.

Для фотоприемника с апертурой круглой формы заметное влияние на характеристики фазометра оказывает функциональная зависимость амплитуды видеосигнала от взаимного пространственного расположения приемника и сканируемой полосы интерференции в плоскости изображения. Очевидно, что амплитуда первой гармоники видеосигнала основной частоты, характеризующая смещение полосы по выбранной оси плоскости изображения, зависит нелинейно от величины этого смещения. Подробный анализ влияния этих факторов на характеристики оптических фазометров представляет самостоятельный интерес. Заметим, что результаты анализа влияния геометрии и размера элемента приемника фазометра с целью достижения максимального отношения сигнал/шум показывают наличие оптимальных соотношений размера фотоприемника $r_{фп}$ с фрактальной и текстурной размерностью, видом функции, в общем случае, полимодальной гистограммы распределения и коэффициента вариации анализируемой сцены и другими параметрами системы, обеспечивающих экстремальное отношение сигнал/шум с учетом вариаций статистики распределения случайных воздействий. Можно показать, что при слежении за полосой N-ого порядка интерференции, в предположении гауссовской плотности распределения яркости в фрактале изображения полосы интерференции размером $2r_{фр}$ система обеспечивает максимум потенциально возможного отношения сигнал/шум на выходе согласованного со спектром сигнала фильтра при следующих оптимальных размерах апертуры фотоприемника: для круглой формы с равномерным распределением прозрачности $r_{фп}/r_{фр} = 1,53$; для квадратной формы апертуры $r_{фп}/r_{фр} = 1,3$; для гауссовской плотности распределения прозрачности апертуры фотоприемника $r_{фп}/r_{фр} = \sqrt{2}$. В угловой мере фазового распределения в картине интерференции оптимальный размер фотоприемника в зависимости от формы апертуры и вида статистики распределения соответственно равен: $1,5\pi$; $1,3\pi$; $\sqrt{2}\pi$ при оптимальном размере следящего сканирования ~ $0,6\pi$. В отличие от известных схем интерферометров, в описанном методе опорное напряжение на синхронный фазовый детектор – дискриминатор следящего фазометра поступает непосредственно от генератора следящего сканирования, задающего стабильные модуляционные колебания в процессе слежения за оптической фазой. Это сводит к минимуму влияние нестабильности амплитуды и частоты модуляции при следящем сканировании полосы интерференции.

При определении систематических составляющих погрешности измерений следует учесть, что выбор оптимального размера следящего сканирования из условия минимизации средней квадратической погрешности и обеспечения высокой стабильности (от 10^{-3} и выше) амплитуды и частоты следящего сканирования исключают систематические погрешности, которые обусловлены дополнительным фазовым набегом сигнала первой гармоники к смещениям относительно опорного уровня сравнения фаз сигналов и определяют линейно связанную с этими факторами повышенную стабильность амплитуды и фазы выходного сигнала. Это минимизирует уровень систематической погрешности в оптическом следящем фазометре. Повышение точности метода и снижения уровня составляющих систематической погрешности, в том числе, обусловленной гистерезисом упругого привода зеркала, обеспечивается повышением частоты следящего сканирования (режим многократных выборок на опорном интервале измерения) с последующим усреднением результатов измерения фазового рассогласования на каждом такте изменения опорного уровня оценки положения полосы интерференции. Эта возможность реально присутствует, так как одно из важных требований обеспечения надежной работы следящей системы контроля положения полосы интерференции – необходимость задания относительно высокой частоты следящего сканирования зеркалом, которая по условию обеспечения быстродействия более чем на порядок должна превышать требуемую частоту среза амплитудной и фазочастотной характеристик измерительной системы с обратной связью. Для оценки погрешностей метода на линейном $x(t) = \kappa(t)x_0$ и гармоническом входном сигналах $x(t) = x_0\sin\omega t$ были определены экспериментальные динамические амплитудная, амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики. Нелинейность динамической амплитудной характеристики, определяющая погрешность воспроизведения формы входного сигнала интерферометром, составила менее 0,05 % – для линейного и менее 0,5 % – для гармонического сигналов в амплитудном 0,1...5 мкм и частотном 0,01...10 кГц диапазонах линейных и гармонических перемещений зеркала. Амплитудно-частотная характеристика с погрешностью ~ $5\cdot10^{-3}$ параллельна частотной оси в рабочем диапазоне перемещений зеркала интерферометра, а фазочастотная – с допустимой погрешностью измерения фазы совпадает с направлением оси.

Рассмотренный метод представляет собой адаптивную разновидность нулевого компенсационного метода с модуляцией разности хода, дающего [1] наиболее высокую точность измерения порядка интерференции. Он может применяться в стабильном эталоне Фабри-Перо, используемом при решении задач оптической интерферометрии. Так как предложенный метод при использовании с высокоточными угломерными устройствами намного проще и более универсален, то он дает возможность работы

с любым монохроматическим источником излучения, в спектре которого имеются одноэлементные интегрального типа фотоприемники, не обязательно точечные. Оптической редукцией осуществляется необходимое оптимальное согласование геометрии. Высокая точность описанного метода позволяет проводить динамические измерения малых смещений и особенно полезна при определении взаимосвязи смежных пьезопреобразователей [1, 2, 5] базисных, управляющих формой поверхности, элементов в акустических и оптических активных системах управления формой приемных антенн и волнового фронта излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устинов Н.Д., Матвеев И.Н., Протопопов В.В. Методы обработки оптических полей в лазерной локации. — М.: Наука, 1983. — 272 с.
2. Слободян С.М. Диссекторные гетеродинные системы // Зарубежная радиоэлектроника. — 1986. — № 6. — С. 62—72.
3. Пустынский И.Н., Слободян С.М. Диссекторные следящие системы. — М.: Радио и связь, 1984. — 136 с.
4. А. с. 466825 СССР. МКИ H04N 3/16. Устройство телевизионной развертки / С.М. Слободян // Открытия. Изобретения. — 1973. — № 27.
5. Слободян С.М. Моделирование адаптивных оптикоэлектронных следящих систем контроля и управления объектами // Информационные технологии и математическое моделирование: Матер. Всеросс. научно-практ. конф. — Томск: Изд-во "Твердыня", 2002. — С. 300—301.

УДК 681.3.01